



## FDM KAPLAMALI ZENGİNLEŞTİRİLMİŞ METAL ÇEKİRDEKLİ TAM KONİ KABUĞUN SERBEST TİTREŞİM ANALİZİ

Abdullah AVEY<sup>1</sup>, Erdal OSMANÇELEBİOĞLU<sup>2</sup>

<sup>1</sup> İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta

<sup>2</sup>Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Öğrencisi, Isparta

<sup>2</sup>Alfredstr 14, 45130 Essen, Almanya

### ABSTRACT

The free vibration analysis of the sandwich complete conical shell with functionally graded materials (FGMs) facings based on the classical shell theory (CST) is studied. The basic equations of metal-rich truncated conical shells with FGMs facings are derived on the basis of classical shell theory (CST) and solved by employing Galerkin's method. The closed form solution for dimensionless frequency parameters of the sandwich complete conical shell with FGM facings is found. The effects of kinds of FGM facings and variation of thickness of facings on the magnitudes of dimensionless frequency parameters are studied in numerical analysis part.

**Keywords:** Functionally graded materials (FGMs), FGM facings, sandwich complete conical shell, metal-rich core, free vibration, frequency parameters

### ÖZET

Çekirdeği zenginleştirilmiş metal ve kaplaması fonksiyonel değişimli malzemelerden (FDM'lerden) oluşan sandviç tam koni kabuğun serbest titreşim analizi klasik kabuk teorisi (KKT) çerçevesinde incelenmektedir. FDM kaplamalı zenginleştirilmiş metal çekirdekli koni kabukların temel denklemleri türetilerek Galerkin Yöntemi ile çözülmektedir. FDM kaplamalı sandviç tam koni kabuğun boyutsuz titreşim frekansı için kapalı çözüm elde edilmektedir. Sayısal analiz kısmında, kaplama profilleri ve onların kalınlık değişiminin boyutsuz frekans parametre değerlerine etkileri incelenmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Fonksiyonel değişimli malzeme (FDM), FDM Kaplama, sandviç tam koni kabuk, zenginleştirilmiş metal çekirdek, serbest titreşim, frekans parametresi

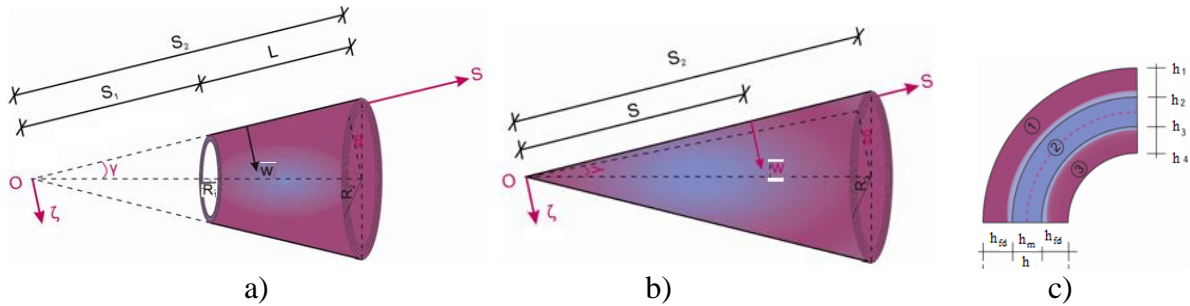
### GİRİŞ

Uçak, uzay gemileri, uydular ve nükleer reaktörler gibi hassas teknolojilerde, yüksek performanslı taşıyıcı komponentlerin yenilikçi tasarımı her zaman ön planda olmuştur. Kaplama veya çekirdek malzeme olarak yeni nesil kompozit malzemelerin geliştirilmesi çabaları, kompozit yapılarda muhtemel tasarım konseptleri arasında sandviç yapıların oluşturulması fikrini giderek popüler hale getirmektedir. Bu tür yapılar, bazı dirençleri azaltmak için iyi termik ve akustik yalıtım, hafiflik ve uzun ömür, yüksek mukavemet ve sertlik gibi özelliklere sahip olmanın yanı sıra kolay üretilmelidir [1,2]. Katmanlar arasındaki

yüzeylerde güçlü gerilme yoğunlaşmasından dolayı delaminasyonun meydana gelmesi geleneksel sandviç yapıların temel dezavantajlarından biridir. Bu nedenle tasarımcı, sandviç yapı elemanları için en iyi malzemeleri seçmek için malzeme sınıfını sistematik olarak genişletme ihtiyaç duyar. Son yıllarda geniş bir uygulama yelpazesine sahip olmasından dolayı üretilen fonksiyonel değişimli malzemeler (FDM) bu tür kompozit malzemeler sınıfına aittir [3-6]. Bir yüzeyden diğeri FDM özelliklerinin pürüzsüz ve sürekli değişimi katmanlı kompozitlerdeki gerilme yoğunlaşmasını azaltır ve arayüz problemlerini önlemeye katkı sağlar. FDM tabaka içeren sandviç plak ve kabukların tasarımı, titreşim ve stabilitesi ile ilgili ilk çalışmalar kaynak [7, 8]' de sunulmaktadır. Bu alışmaları takiben sandviç yapı elemanlarının stabilite ve titreşim problemleri değişik teoriler kullanılarak özölmüştür [9-11]. Yapılan literatür taraması tam koni kabukların titreşimi ile ilgili yayın sayısının yeterli kadar az olduğunu göstermektedir [12]. Bu alışmada, FDM kaplamalı sandviç tam koni kabuğın boyutsuz titreşim frekansı için kapalı çözümü bulunarak literatürdeki söz konusu eksiklik az olsa da giderilmeye çalışılmaktadır.

### TEMEL BAĞINTI VE DENKLEMLER

Şekil 1a'da, FDM kaplamalı zenginleştirilmiş metal çekirdekli sandviç kesik koni kabuk sunulmaktadır. Bu sandviç kesik koni kabuk sandviç tam koni kabuğa tamamlanmaktadır (Şekil 1b). FDM kaplamalı zenginleştirilmiş metal çekirdekli sandviç koni kabuklar üçlü bir sistem oluşturulmaktadır. OSθ koordinat sistemi tam koni kabuğın tepesinde ve üç tabakalı sistemim referans yüzeyinde göz önüne alınmaktadır. Eksenler ve bazı koni kabuk parametreleri şekiller üzerinde açıklanmaktadır (Şekil 1a). Tam koni kabuğın uzunluğu  $S_2$  ve kesik koni kabuğın uzunluğu  $L$ , küçük ve büyük tabanlarının yarıçapları  $R_1$  ve  $R_2$  'dir. Koni kabukların genel kalınlığı  $h = 2h_{fd} + h_m$  olup  $h_m$  metal ekirdeğın ve  $h_{fd}$  FDM kaplamaların kalınlıklarıdır (Şekil 1c).



Şekil 1. a) FDM kaplamalı kesik ve b) tam koni kabuklarda koordinat sistemi, c) katmanların diziliş; (1) FDM, (2) Zenginleştirilmiş metal, (3) FDM

FDM kaplamalı sandviç koni kabukların tabakalarındaki malzemelerin hacim kesir bileşenleri aşğıdaki gibi ifade edilir [11]:

$$\begin{aligned} V^{(1)} &= (2\bar{\zeta} + 1)/(2\zeta_2 + 1), & 1. \text{ katman} \\ V^{(2)} &= 1, & 2. \text{ katman} \\ V^{(3)} &= (2\bar{\zeta} - 1)/(2\zeta_3 - 1), & 3. \text{ katman} \end{aligned} \quad (1)$$

FDM kaplamalı sandviç koni kabukların malzeme özelliklerinin, matematiksel modelleri aşğıdaki şekilde ifade edilir [11]:

$$\begin{aligned} E_{fd}^{(1)} &= E_s e^{V^{(1)} \ln(E_m/E_s)}, \quad v_{fd}^{(1)} = v_s e^{V^{(1)} \ln(v_m/v_s)}, \quad \rho_{fd}^{(1)} = \rho_s e^{V^{(1)} \ln(\rho_m/\rho_s)} \\ E_{fd}^{(3)} &= E_s e^{V^{(3)} \ln(E_m/E_s)}, \quad v_{fd}^{(3)} = v_s e^{V^{(3)} \ln(v_m/v_s)}, \quad \rho_{fd}^{(3)} = \rho_s e^{V^{(3)} \ln(\rho_m/\rho_s)} \end{aligned} \quad (2)$$

Burada  $E_m, v_m, \rho_m$  ve  $E_s, v_s, \rho_s$  sırasıyla, sandviç koni kabuklardaki FDM kaplamaların metal ve seramik yüzeylerinin Young modülleri, Poisson oranları ve yoğunluklarıdır.

FDM kaplamalı sandviç koni kabukların tabakalarındaki malzemelerin özellikleri aşağıdaki gibi tasarlanmaktadır [11]:

$$[E_{sand}, v_{sand}] = \begin{cases} E_{fd}^{(1)}, v_{fd}^{(1)}, \rho_{fd}^{(1)} & -h_1 \leq \zeta \leq -h_2 \\ E_m, v_m, \rho_m & -h_2 < \zeta < h_3 \\ E_{fd}^{(3)}, v_{fd}^{(3)}, \rho_{fd}^{(3)} & h_3 \leq \zeta \leq h_4 \end{cases} \quad (3)$$

Kuvvet ve moment bileşenleri aşağıdaki gibi tanımlanır [7-12]:

$$(T_{ij}, M_{ij}) = \sum_{k=1}^3 \int_{h_k}^{h_{k+1}} [1, \zeta] \sigma_{ij}^{(k)} d\zeta \quad (i, j = 1, 2) \quad (4)$$

Burada  $T_{ij}$  ve  $M_{ij}$  ( $i = 1, 2$ ) kuvvet ve moment bileşenlerini,  $\sigma_{ij}^{(k)}$  ( $i = 1, 2; j = 2, 3$ ) FDM kaplamalı sandviç koni kabukların tabakalarındaki kayma gerilmelerini ve  $k = 1, 2, 3$  olup katman sayısını göstermektedir.

FDM kaplamalı sandviç koni kabukların gerilme-deformasyon bileşenleri arasındaki bağıntılar aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11}^{(k)} \\ \sigma_{22}^{(k)} \\ \sigma_{12}^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11}^{(k)} & Q_{12}^{(k)} & 0 \\ Q_{12}^{(k)} & Q_{11}^{(k)} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66}^{(k)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Burada  $Q_{ij}^{(k)}$ , ( $i, j = 1, 2, \dots, 6; k = 1, 2, 3$ ), katmanlardaki malzeme özelliklerine bağlı nicelikleri içeren katsayılarıdır [11].

Kuvvet bileşenleri ve Airy gerilme fonksiyonu arasındaki bağıntılar şu şekildedir [6]:

$$T_{11} = h \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2}, T_{22} = h \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2}, T_{12} = -h \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x \partial y} \quad (6)$$

(5) bağıntıları (4) integrallerinde yerine yazılarak elde edilen sonuçlar (6) bağıntıları ile birlikte koni kabuğun hareket ve deformasyon uygunluk denklemlerinde [9] yerine yazıldığında, bazı işlemlerden sonra FDM kaplamalı sandviç koni kabukların hareket ve deformasyon uygunluk denklemleri aşağıdaki şekle dönüşür:

$$\begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} \\ L_{21} & L_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi \\ w \end{bmatrix} = 0 \quad (7)$$

Burada şu tanımlar geçerlidir:

$$\begin{aligned} L_{11} &= C_{02}e^{-4x} \left( \frac{\partial^4}{\partial x^4} - 4 \frac{\partial^3}{\partial x^3} + 4 \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^4}{\partial \phi^4} + 2 \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} \right) \\ &\quad + (2C_{01} - C_{05})e^{-4x} \left( \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial \phi^2} - 2 \frac{\partial^3}{\partial x \partial \phi^2} + \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} \right) + S_2 e^{-3x} \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{\partial}{\partial x} \right) \cot \gamma \\ L_{12} &= -C_{03}e^{-4x} \left( \frac{\partial^4}{\partial \phi^4} + 2 \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^4}{\partial x^4} - 4 \frac{\partial^3}{\partial x^3} + 4 \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) \\ &\quad - (2C_{04} + C_{06})e^{-4x} \left( \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial \phi^2} + 2 \frac{\partial^3}{\partial x \partial \phi^2} - \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} \right) - \rho_t S_2^4 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \\ L_{21} &= B_{01}e^{-4x} \left( \frac{\partial^4}{\partial x^4} - 4 \frac{\partial^3}{\partial x^3} + 4 \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^4}{\partial \theta_1^4} + 2 \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} \right) \\ &\quad + (2B_{02} + B_{05})e^{-4x} \left( \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial \phi^2} - 2 \frac{\partial^3}{\partial x \partial \phi^2} + \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} \right) \\ L_{22} &= -B_{04}e^{-4x} \left( \frac{\partial^4}{\partial \phi^4} + 2 \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^4}{\partial x^4} - 4 \frac{\partial^3}{\partial x^3} + 4 \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) \\ &\quad + (B_{06} - 2B_{03})e^{-4x} \left( \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial \phi^2} - 2 \frac{\partial^3}{\partial x \partial \phi^2} + \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} \right) + S_2 e^{-3x} \cot \gamma \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{\partial}{\partial x} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

Burada  $\phi = \theta \sin \gamma$  ve  $x = \ln(S/S_2)$  olup sonraki aşamada integralleme işlemini kolaylaştırmak için kullanılan yeni değişkendir ve  $C_{0i}, B_{0i}$  ( $i = 1, 2, \dots, 6$ ), FDM kaplamalı sandviç koni kabukların malzeme özelliklerine bağlı parametrelerdir [11].

### TEMEL DENKLEMLERİN ÇÖZÜMÜ

FDM kaplamalı koni kabuk basit mesnetli olduğu için, (7) denklemlerinin çözümü aşağıdaki gibi aranır [11, 12]:

$$\Psi(x, \theta, t) = \bar{\Psi}(t) S_2 e^{(\lambda+1)x} \sin(m_1 x) \cos(m_2 \phi), \quad w(x, \theta, t) = \bar{w}(t) e^{\lambda x} \sin(m_1 x) \cos(m_2 \phi) \quad (9)$$

Burada,  $\bar{\Psi}(t)$  ve  $\bar{w}(t)$  zamana bağlı bilinmeyen fonksiyonlar ve  $\lambda$  bilinmeyen parametre olup tam koni kabukların frekansının minimum değerlerinde 2.4 değeri almaktadır. Ayrıca,  $m_1 = \frac{m\pi}{x_0}$ ,  $m_2 = \frac{n}{\sin \gamma}$ ,  $x_0 = \ln \frac{S_2}{S_1}$  parametreler olup  $m$  koninin meridyonel doğrultusunda yarım dalga sayısı ve  $n$  ise dairesel dalga sayısıdır.

$S_1 \rightarrow 0$  olduğu dikkate alınarak, (9) bağıntıları (7) denklemlerinde yerine yazılıp Galerkin yöntemi uygulandığında ve bazı matematiksel işlemlerden sonra FDM sandviç tam koni kabuğun boyutsuz serbest titreşim frekansı için şu ifade özel olarak elde edilmektedir:

$$\omega_1 = \frac{S_2}{h} \sqrt{\frac{\Lambda_1 + \Lambda_2}{\Lambda_3 \Lambda_p} \frac{\rho_s}{E_s}} \quad (10)$$

Burada şu tanımlar geçerlidir:

$$\begin{aligned} \Lambda_1 &= [C_{02}(A_1 - 4A_2 + 4A_3 + m_2^4 A_5 - 2m_2^2 A_8) + (2C_{01} - C_{05})m_2^2(2A_4 - A_3 - A_5) \\ &\quad + (A_{01} - A_{00})S_2 \cot \gamma] B_{03}(4B_{14} - m_2^4 B_9 + 2m_2^2 B_{12} - B_{13} - 4B_{15}) \\ &\quad - (B_{06} - 2B_{03})m_2^2(B_{10} + 2B_{11}) + B_{00}S_2 \cot \gamma] \\ \Lambda_2 &= [C_{03}m(\beta_2^4 A_9 - 2m_2^2 A_{12} + A_{13} - 4A_{14} + 4A_{15}) + (2C_{04} + C_{06})m_2^2(2A_{11} - A_{10} - A_9)] \quad (11) \\ &\quad \times [B_{01}(m_2^4 B_1 - 2m_2^2 B_4 + B_5 - 4B_6 + 4B_7) - (2B_{02} + B_{05})m_2^2(B_2 + 2B_3 - B_4)] \\ \Lambda_3 &= B_{01}(m_2^4 B_1 - 2m_2^2 B_4 + B_5 - 4B_6 + 4B_7) - (2B_{02} + B_{05})m_2^2(B_2 + 2B_3 - B_4), \\ \Lambda_p &= 2\theta_{2\lambda+2}\rho_t S_2^4, \theta_{2\lambda+i} = \frac{m_1^2}{[(2\lambda+i)^2 + 4m_1^2](2\lambda+i)}; i = -2; -1; 0; 1; 2 \end{aligned}$$

FDM kaplamalı tam koni kabukların boyutsuz frekans parametresinin minimum değerlerini bulmak için (10) ifadesi  $n$  dalga sayısına göre minimize edilir.

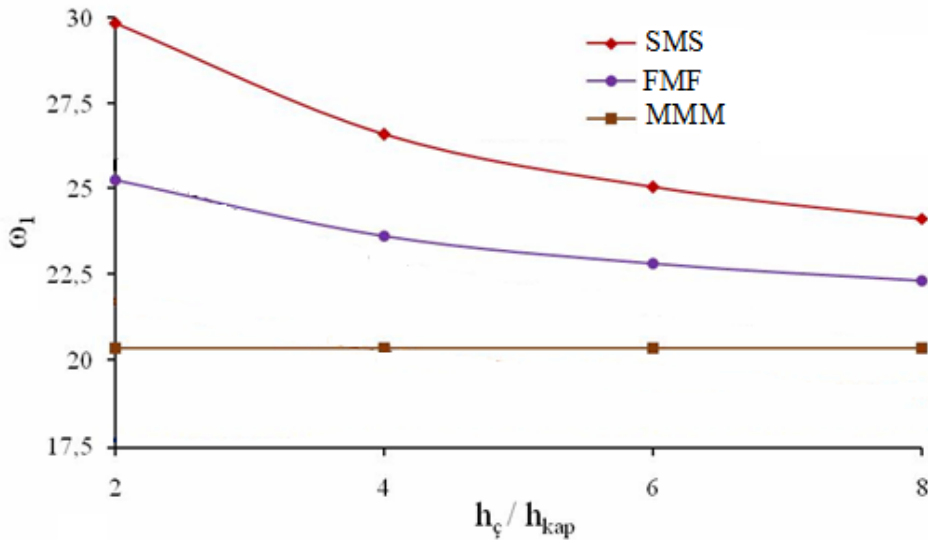
### SAYISAL ANALİZ

Bu bölümde, FDM kaplamalı sandviç tam koni kabukların boyutsuz frekans parametrelerinin minimum değerleri sayısal olarak bulunmakta ve elde edilen sonuçlar analiz edilmektedir. FDM kaplama olarak metal-seramik karışımı olan SUS304/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, yani paslanmaz çelik ve silikon nitrat'ın karışımı kullanılmaktadır [6, 11]. Aşağıdaki gibi tasarlanmış üç çeşit sırasıyla FDM, seramik ve metal kaplamalı sandviç tam koni kabuklar kullanılmaktadır: FMF, SMS ve MMM. Tablo 1' de üç çeşit FMF, SMS ve MMM sandviç tam koni kabukların  $\omega_1$  değerlerinin  $\gamma$  yarı-tepe açısına bağlı olarak değişimi yer almaktadır. Tablo 1 'de sandviç tam koni kabukların geometrik boyutları şu şekildedir:  $h_\gamma / h_{\text{kap}} = 4$ ,  $R_2 / h = 25$ ,  $\lambda = 2.4$ . Ayrıca, parantez içindeki değerler dairesel dalga sayısını ( $n$ ) göstermektedir. Tablo 1' den görüldüğü gibi sandviç tam koni kabukların her üç çeşidinde  $\gamma$  yarı-tepe açısının artışına bağlı olarak  $\omega_1$  değerleri önemli derecede azalmakta iken dairesel dalga sayısı artmaktadır. FMF sandviç tam koni kabuğun  $\omega_1$  değerleri SMS ve MMM kabukların değerleri ile kıyaslandığında FDM kaplamanın etkisi belirgin olup  $\gamma$  yarı-tepe açısının değişiminden yaklaşık olarak bağımsız olduğu ve sırasıyla (-%11) ve %29 civarında olduğu görülmektedir.

**Tablo 1.** FMF, SMS ve MMM tam koni kabukların  $\omega_1$  değerlerinin  $\gamma$  'ya bağlı değişimi

	$\omega_1$				
$\gamma$	15°	30°	45°	60°	75°
FMF	44.061(2)	23.618(3)	13.643(3)	9.494(3)	6.790(3)
SMS	49.409(2)	26.578(3)	15.299(3)	10.640(3)	7.634(3)
MMM	38.200(2)	20.324(3)	11.826(3)	8.242(3)	5.854(3)

şekil 2' de üç çeşit (FMF, SMS ve MMM) tam koni kabukların  $\omega_1$  değerlerinin çekirdek kalınlığının kaplama kalınlığı ( $h_\ / h_{\text{kap}}$ ) oranına bağlı olarak dağılımı sunulmaktadır. Tam koni kabukların geometrik boyutları şu şekildedir:  $R_2 / h = 25$ ,  $\gamma = 30^\circ$  ve  $\lambda = 2.4$ . şekil 2' den görüldüğü gibi  $h_\ / h_{\text{kap}}$  oranı arttığında FMF ve SMS sandviç tam koni kabuklar için  $\omega_1$  değerleri azaldığı görülmektedir. FMF ve SMS sandviç tam koni kabukların  $\omega_1$  değerleri mukayese edildiğinde FDM kaplama profilinin  $\omega_1$  değerlerine etkisi  $h_\ / h_{\text{kap}} = 2$  için yaklaşık (-%15.4) olduğu halde  $h_\ / h_{\text{kap}} = 8$  için önemli derecede azalarak (-%8) olduğu saptanmıştır. Dolayısıyla, FDM kaplama profillerinin  $\omega_1$  değerlerine etkisi  $h_\ / h_{\text{kap}}$  oranının artışı ile azalmaktadır. FMF sandviç tam koni kabukların boyutsuz frekans parametresi değerleri MMM tam koni kabukların değerleri ile karşılaştırıldığında FDM kaplamaların etkisi  $h_\ / h_{\text{kap}} = 2$  için %23.61 olduğu halde  $h_\ / h_{\text{kap}} = 8$  olduğunda bu etki küçülerek %9 olduğu görülmüştür. SMS sandviç tam koni kabukların boyutsuz frekans parametresi değerleri MMM tam koni kabukların değerleri ile karşılaştırıldığında metal ve seramik kaplamaların etkisi  $h_\ / h_{\text{kap}} = 2$  için %46 olduğu halde  $h_\ / h_{\text{kap}} = 8$  olduğunda bu etki küçülerek %18.5 olduğu halde belirginliğini koruduğu görülmüştür.

**şekil 2.** FMF, SMS ve MMM sandviç tam koni kabukların  $\omega_1$  değerlerinin  $h_\ / h_{\text{kap}}$  oranına bağlı değişimi

## SONUÇLAR

ekirdeği zenginleştirilmiş metal ve kaplaması FDM’lerden oluşan sandviç tam koni kabuğun serbest titreşimi analizi KKT çerçevesinde ele alınmaktadır. FDM kaplamalı zenginleştirilmiş metal koni kabukların temel denklemleri türetilerek Galerkin yöntemi ile çözülmektedir. FDM kaplamalı sandviç tam koni kabukların boyutsuz titreşim frekansı için kapalı çözüm elde edilmektedir. Sayısal analizler, kaplama profilleri ve kalınlıkları değişiminin boyutsuz frekans değerlerine olan etkilerinin önemli olduğunu ortaya koymaktadır.

## TEşEKKüR

Yazarlar 113M399 No’lu projeye verdiği destekten dolayı TBTAK’a teşekkür eder.

## KAYNAKLAR

- [1] J.R. Vinson, Sandwich structures, *Applied Mechanics Reviews*. 54 (2001) 201–214. doi:10.1115/1.3097295.
- [2] L. Librescu, T. Hause, Recent developments in the modeling and behavior of advanced sandwich constructions: a survey, *Composite Structures*. 48(2000) 1–17.
- [3] M. Koizumi, FGM activities in Japan, *Composites Part B: Engineering*. 28 (1997) 1–4. doi:10.1016/S1359-8368(96)00016-9.
- [4] K. Ichikawa, Functionally Graded Materials in the 21st Century. A Workshop on Trends and Forecasts, Kluwer Academic Publisher, Boston, 2001.
- [5] E. Mller, C. Draşar, J. Schilz, W.A. Kaysser, Functionally graded materials for sensor and energy applications, *Materials Sciences Engineering A*. 362(2003) 17–39. doi.org/10.1016/S0921-5093(03)00581-1
- [6] H.S. Shen, *Functionally Graded Materials, Nonlinear Analysis of Plates and Shells*, Florida, CRC Press, 2009.
- [7] A.M. Zenkour, A comprehensive analysis of functionally graded sandwich plates: Part 2. Buckling and free vibration, *International Journal Solids and Structures*. 42(2005) 5243–5258. doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2005.02.016
- [8] A.H. Sofiyev, A. Deniz, I.H. Akcay, E. Yusufoglu, The vibration and stability of a three-layered conical shell containing a FGM layer subjected to axial compressive load, *Acta Mechanica*. 183(2006) 129-144. DOI: 10.1007/s00707-006-0328-5
- [9] M. Sobhy, An accurate shear deformation theory for vibration and buckling of FGM sandwich plates in hygrothermal environment, *International Journal of Mechanical Sciences*. 110(2016) 62-77. doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2016.03.003
- [10] A.H. Sofiyev, The vibration and buckling of sandwich cylindrical shells covered by different coatings subjected to the hydrostatic pressure, *Composite Structures*. 117 (2014) 124–134. doi:10.1016/j.compstruct.2014.06.025.
- [11] A.H. Sofiyev, E. Osmanelebioğlu, The free vibration of sandwich truncated conical shells containing functionally graded layers within the shear deformation theory, *Composites Part B: Engineering*. 120(2017)197-211, doi.org/10.1016/j.compositesb.2017. 03.054.
- [12] A.H. Sofiyev, N.Kuruoglu, On the vibration analysis of FGM truncated and complete conical shells under various boundary conditions and resting on elastic foundations, *Journal of Engineering Mathematics*. 77(2012) 131-145. DOI: 10.1007/s10665-012-9535-3